



Prix Pierre Londe 2015



Solenn Le Pense

Modélisation hydro-mécanique
du couplage endommagement-plasticité
dans les géomatériaux non saturés



UNIVERSITÉ
— PARIS-EST

Directeurs de thèse :

Ahmad POUYA

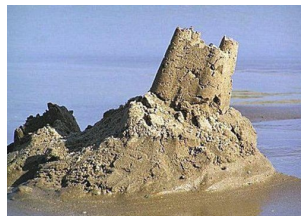
Behrouz GATMIRI



3 décembre 2015

Mécanique des géomatériaux multiphasiques

Modification des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en eau :



Fissuration induite par une modification de la teneur en eau :



Stockage de déchets radioactifs à grande profondeur

Laboratoires souterrains

France

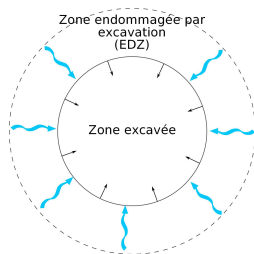
Argilite de Bure
prof. 490m

Belgique

Argile de Boom
prof. 224m



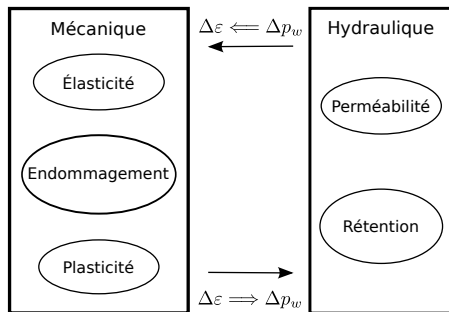
Front d'excavation dans l'argile de Boom - galerie de diamètre 2.5 m
(Van Marcke and Bastiaens, 2010)



- Excavation \implies décompression
- Redistribution des contraintes
- Création d'une zone endommagée par excavation (EDZ)
- Modification de la perméabilité
- Désaturation induite par la ventilation

Objectifs de la thèse

- Développement d'un cadre de modélisation pour le comportement mécanique des géomatériaux non-saturés incorporant les phénomènes dissipatifs d'endommagement et de plasticité.

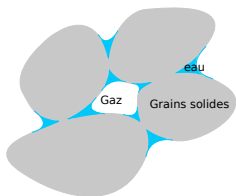


- Implémentation dans un code aux éléments finis pour simulation de problèmes couplés 1D et 2D

- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

Géomatériaux non saturés



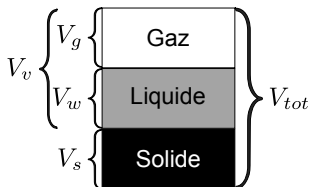
Trois phases :

Solide : squelette solide

Liquide : eau, air dissous

Gaz : air et vapeur d'eau

- Porosité : $\phi = \frac{V_v}{V_{tot}}$
- Degré de saturation : $S_l = \frac{V_w}{V_v}$
- Succion : $s = p_g - p_l$



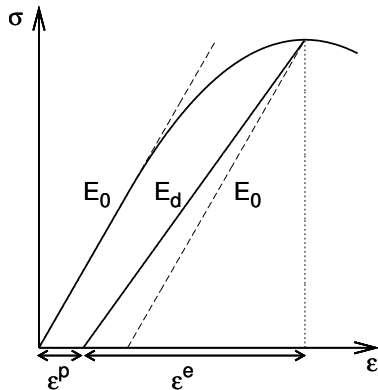
Phénomènes dissipatifs

Plasticité :

- Déformations irréversibles

Endommagement :

- Création de micro-fissures
- Dégradation des propriétés élastiques
- Modification des propriétés de transfert



1 Modélisation

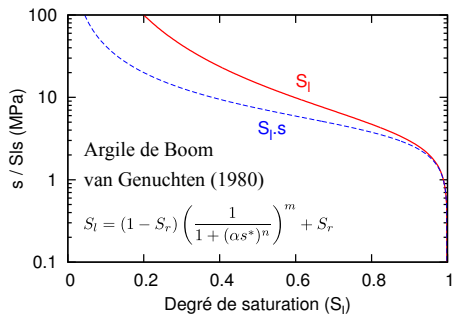
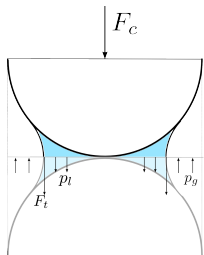
- Contrainte doublement effective prenant en compte les effets de l'endommagement et de la non-saturation
- Phénomènes dissipatifs - Endommagement et plasticité

2 Simulation d'essais de laboratoire

3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique

4 Conclusions

Variables d'état pour les sols non saturés



Contrainte effective

(effets de la non-saturation) :

$$\begin{aligned} \sigma^* &= \sigma - [p_l S_l + (1 - S_l) p_g] \mathbf{I} \\ &= \sigma^{net} + s S_l \mathbf{I} \end{aligned}$$

Élasticité :

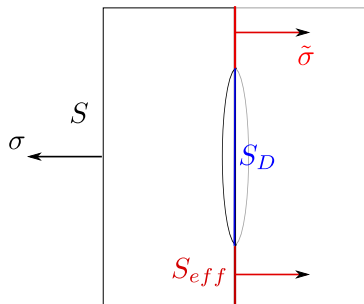
$$\dot{\sigma}^* = \mathbf{D}_e(\sigma^*) \dot{\epsilon}^e$$

Propriétés de rétention :

$$S_l = f(s^*)$$

Endommagement

Principe de la contrainte effective (Kachanov, 1958)



Section résistante diminue avec l'endommagement

$$F = \sigma S = \tilde{\sigma} S_{eff}$$

$$\tilde{\sigma} > \sigma$$

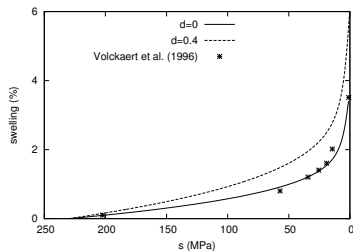
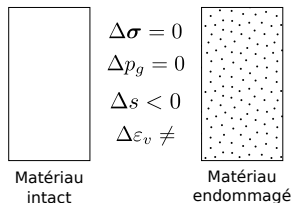
$$d = \frac{S_D}{S} \implies \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-d}$$

Extension à un tenseur de contrainte (hypothèse d'isotropie) : $\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-d}$

Contrainte doublement effective

	Hypothèse 1	Hypothèse 2
$\tilde{\sigma}^*$	$\frac{\sigma^*}{1-d}$	$\tilde{\sigma} - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}$
	$\frac{\sigma - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}}{1-d}$	$\frac{\sigma}{1-d} - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}$
$\dot{\sigma}^*$	$\frac{(\dot{S}_l s + S_l \dot{s}) \mathbf{I}}{1-d}$	$(\dot{S}_l s + S_l \dot{s}) \mathbf{I}$

Essai de gonflement libre

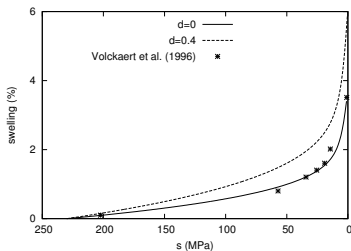
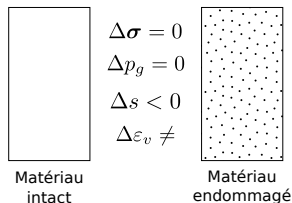


Essai de gonflement oedométrique

Contrainte doublement effective

	Hypothèse 1	Hypothèse 2
$\tilde{\sigma}^*$	$\frac{\sigma^*}{1-d}$ $\frac{\sigma - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}}{1-d}$	$\tilde{\sigma} - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}$ $\frac{\sigma}{1-d} - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}$
$\dot{\sigma}^*$	$\frac{(\dot{S}_l s + S_l \dot{s}) \mathbf{I}}{1-d}$	$(\dot{S}_l s + S_l \dot{s}) \mathbf{I}$

Essai de gonflement libre



Essai de gonflement oedométrique

1 Modélisation

- Contrainte doublement effective prenant en compte les effets de l'endommagement et de la non-saturation
- Phénomènes dissipatifs - Endommagement et plasticité

2 Simulation d'essais de laboratoire

3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique

4 Conclusions

Stratégie pour la modélisation de l'endommagement

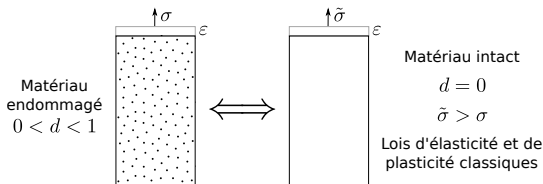
Contrainte doublement effective

$$\tilde{\sigma}^* = f(\sigma, s, d)$$

+

Principe d'équivalence des déformations

(Lemaitre and Chaboche, 1978)



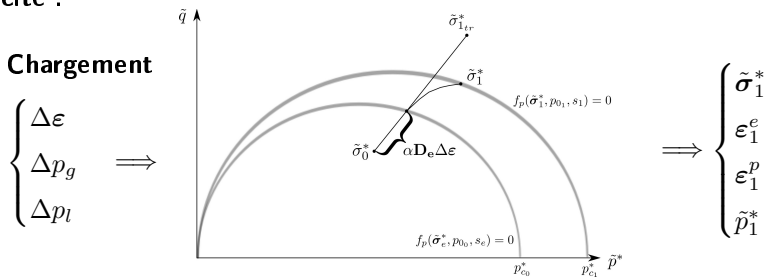
Élasticité :

$$\dot{\tilde{\sigma}}^* = \mathbf{D}_e(\tilde{\sigma}^*) \dot{\epsilon}^e$$

Critères d'endommagement
et de plasticité fonction de
la contrainte doublement
effective

Algorithme local

- **Contrainte doublement effective** : $\tilde{\sigma}_0^* = f(\sigma_0, s_0, d_0)$
- **Plasticité** :



- **Endommagement** :

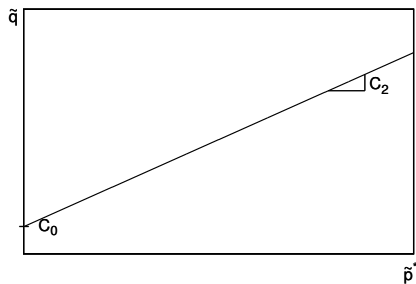
$$d_1 = d_0 + \Delta d$$

$$\Delta d = f(\Delta \tilde{\sigma}^*)$$

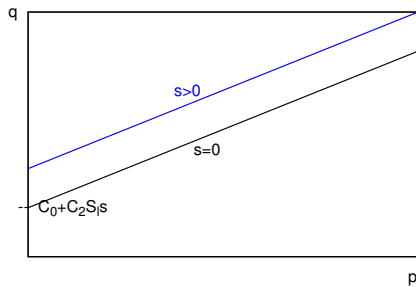
- **État final - Calcul de la contrainte totale** :

$$\sigma_1 = \tilde{\sigma}_1^*(1 - d_1) + p_{g1} \mathbf{I}_d - S_l(s_1) s_1 \mathbf{I}_d$$

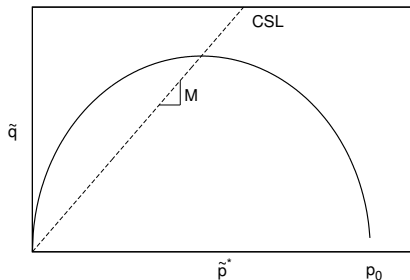
Critère d'endommagement

Contraintes effectives : $f_d(\tilde{\sigma}^*)$ Contraintes totales : $f_d(\sigma, s)$

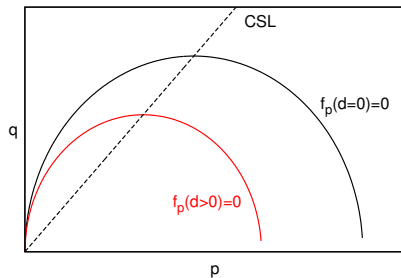
Effet de la succion



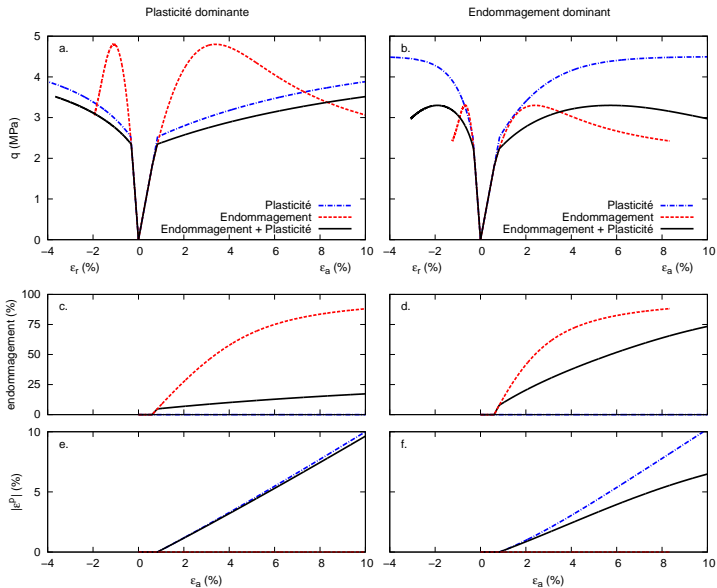
Critère de plasticité

Contraintes effectives : $f_p(\tilde{\sigma}^*)$ Contraintes totales : $f_p(\sigma, d)$

Effet de l'endommagement



Couplage endommagement-plasticité

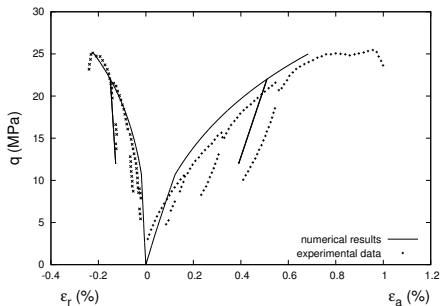


- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

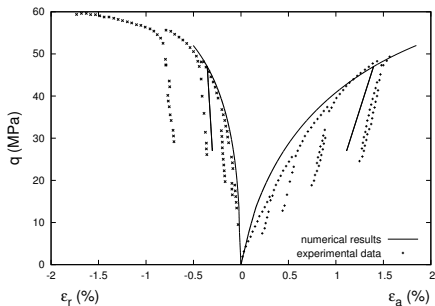
Argilite du Calovo-Oxfordien - Comportement mécanique

Élasticité		Plasticité				Endommagement		
K	ν	M	λ_0	η_d	p_0	C_0	C_1	C_2
GPa			GPa^{-1}		MPa	MPa	MPa	
5	0.19	0.25	0.2	0.05	100	0	200	0.2

Essai de compression triaxiale (Chiarelli, 2000)



Confinement 0 MPa

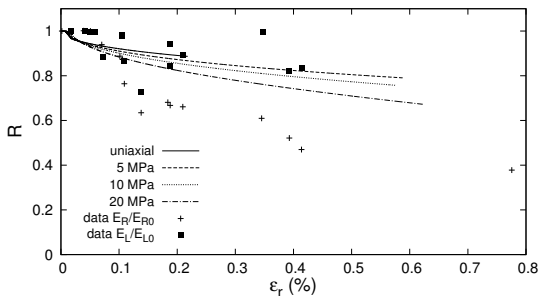


Confinement 20 MPa

Argilite du Calovo-Oxfordien - Comportement mécanique

Élasticité		Plasticité				Endommagement		
K	ν	M	λ_0	η_d	p_0	C_0	C_1	C_2
GPa			GPa^{-1}		MPa	MPa	MPa	
5	0.19	0.25	0.2	0.05	100	0	200	0.2

Essai de compression triaxiale (Chiarelli, 2000)

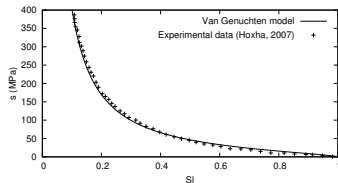
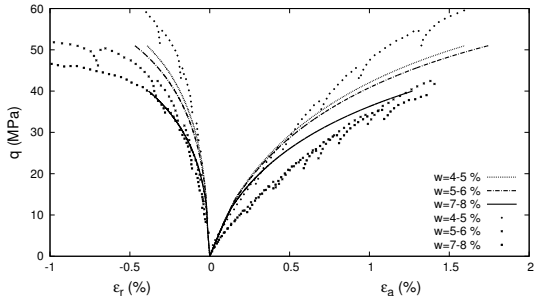


Évolution du module de compressibilité apparent avec la déformation axiale

Comportement hydromécanique

Paramètres de la courbe de rétention

α_{vg} (MPa ⁻¹)	n_{vg}	m_{vg}
0.04	1.5	0.55

*Courbe de rétention (Hoxha et al., 2007)**Courbes contrainte-déformation pour différents teneurs en eau (confinement 20 MPa)*

- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

Implémentation numérique - Équations du problème couplé

Équations d'équilibre : $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \dot{\mathbf{b}} = 0$

$$\dot{\rho}_w + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{V}_w) = 0$$

Lois constitutives : Solide : $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D}_{\text{dep}}(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^*, d)\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{F}_s(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^*, d)\dot{p}_l$

Eau : $\mathbf{V}_w = -K_w \nabla \left(-\frac{s}{\gamma_w} + z \right)$

$$K_w(\phi, S_l) = K_{w0} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \left(\frac{S_l - S_r}{1 - S_r} \right)^n$$

Implémentation numérique : Code θ -Stock ([Gatmiri and Arson, 2008](#))

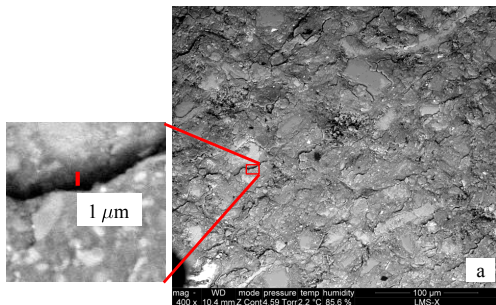
- Discrétisation dans l'espace (Éléments finis) et dans le temps (θ -method).

- $$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{uu} & \mathbf{R}_{uw} \\ \mathbf{C}_{wu} & \mathbf{C}_{ww} + \theta \Delta t \mathbf{K}_{ww} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{p}_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{F}_\sigma \\ \theta \Delta t \Delta \mathbf{F}_w \end{Bmatrix} + \Delta t \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{F}_{wn} - \mathbf{K}_{ww} \mathbf{p}_{wn} \end{Bmatrix}$$

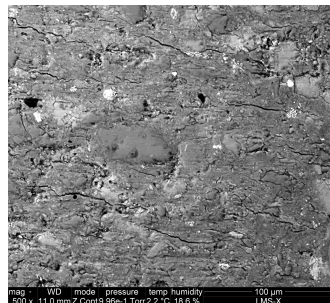
- Méthode de Newton-Raphson modifiée + algorithme local

- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
 - Endommagement due à un chargement hydrique
 - Excavation non drainée
- 4 Conclusions

Micro-fissuration lors d'un chargement hydrique



Humidification de 65 à 90 % RH (Wang, 2012)

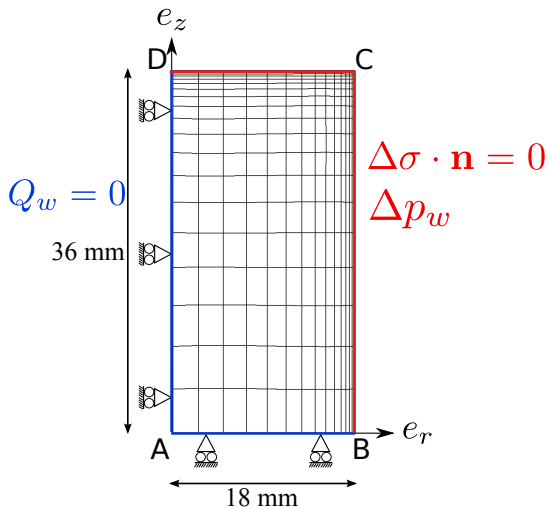


Dessiccation de 65 à 20 % RH

- Initiation de la micro-fissuration lors du chargement
- Sensible à la vitesse de chargement

Modélisation

Problème axisymétrique

**Conditions initiales :**

- $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = 0$ MPa
- succion initiale, s_0

Chargement :

- Succion finale, s_1
- Vitesse de chargement
- $p_g = p_{g0} = 0$ MPa

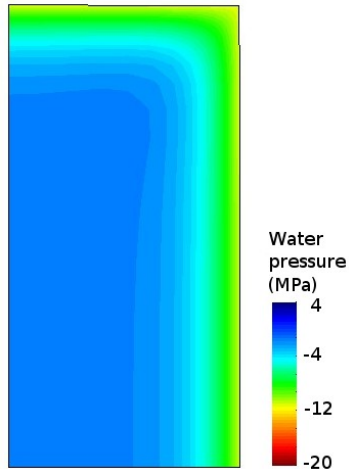
Conductivité hydraulique :

- K_{w0}

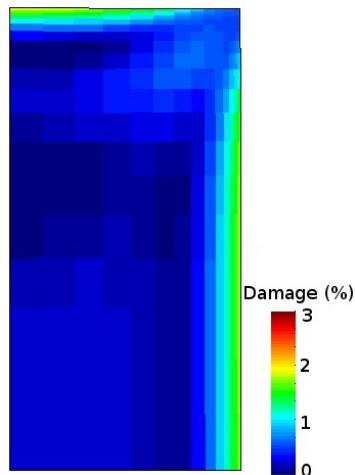
Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

 $t=45 \text{ min}$

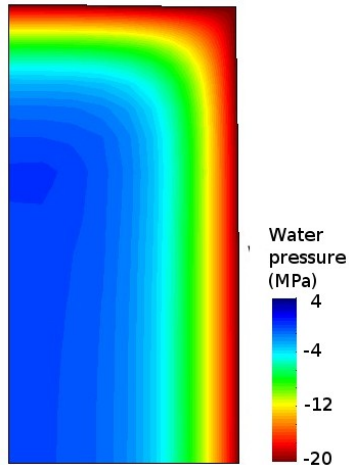
Endommagement

 $t=45 \text{ min}$

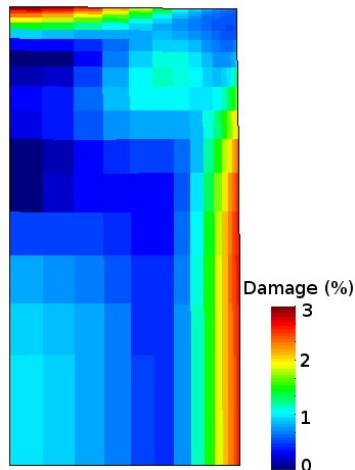
Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

 $t=1\text{h}30$

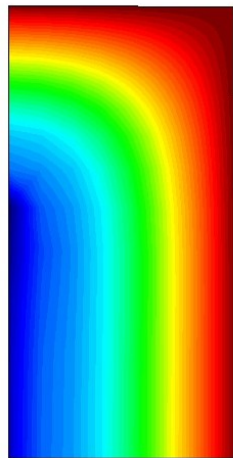
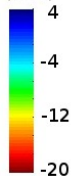
Endommagement

 $t=1\text{h}30$

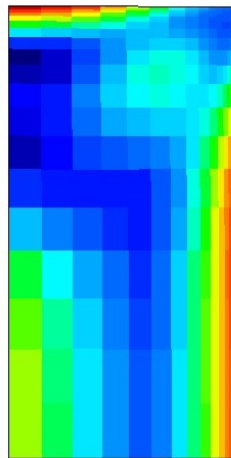
Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

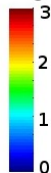
Pression d'eau

 $t=3h$ Water
pressure
(MPa)

Endommagement

 $t=3h$

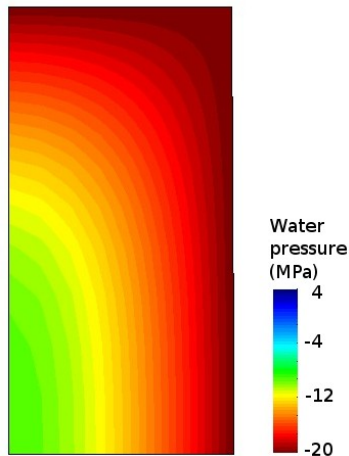
Damage (%)



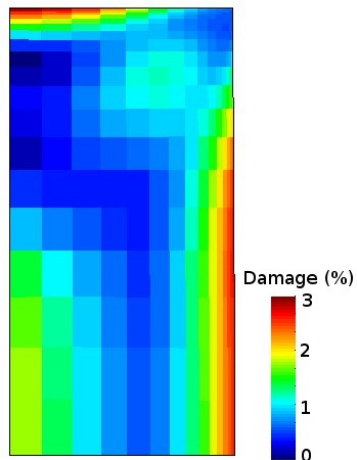
Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

 $t=6h$

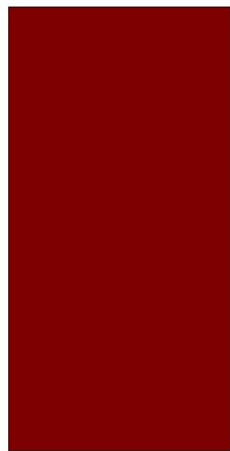
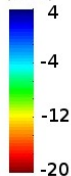
Endommagement

 $t=6h$

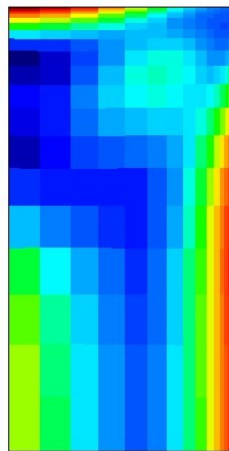
Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

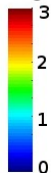
Pression d'eau

 $t=20h$ Water
pressure
(MPa)

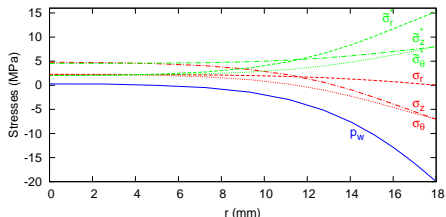
Endommagement

 $t=20h$

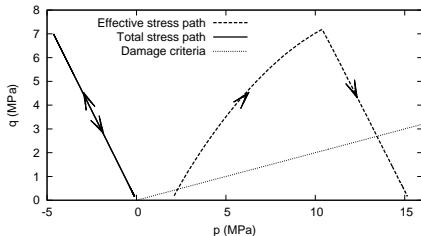
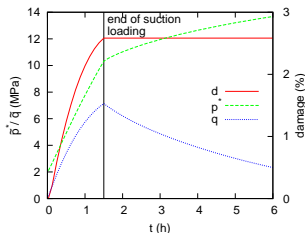
Damage (%)



Dessiccation - Analyse des contraintes

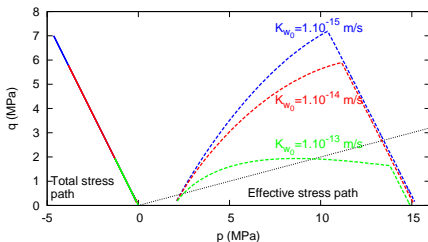
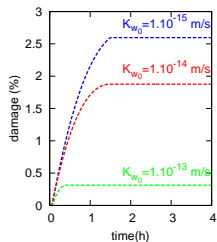
Distribution spatiale des contraintes (AB) - $t=1h30$ 

Évolution des contraintes à la surface de l'échantillon (Point B)

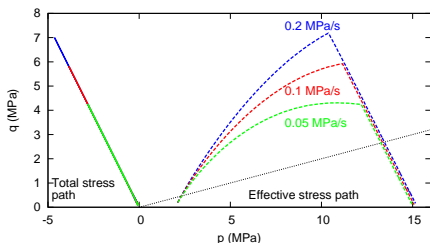
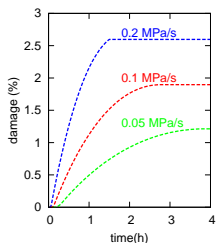


Dessiccation

Effet de la perméabilité



Effet de la vitesse de chargement

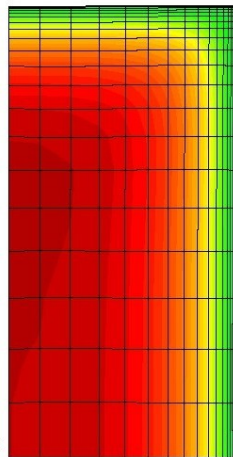


Humidification

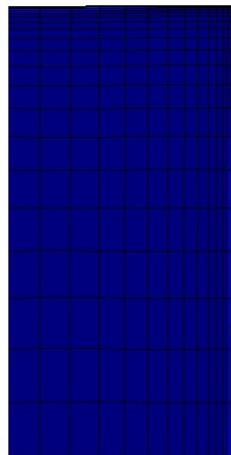
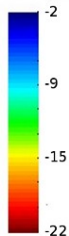
$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

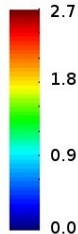
Endommagement



Suction (MPa)



Damage (%)

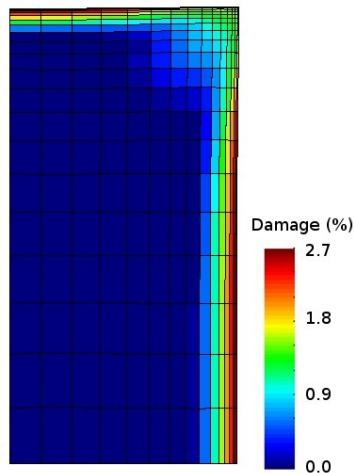
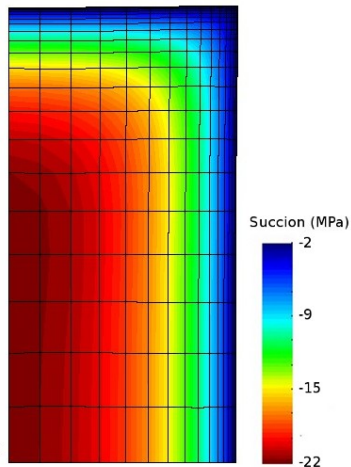


Humidification

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

Endommagement

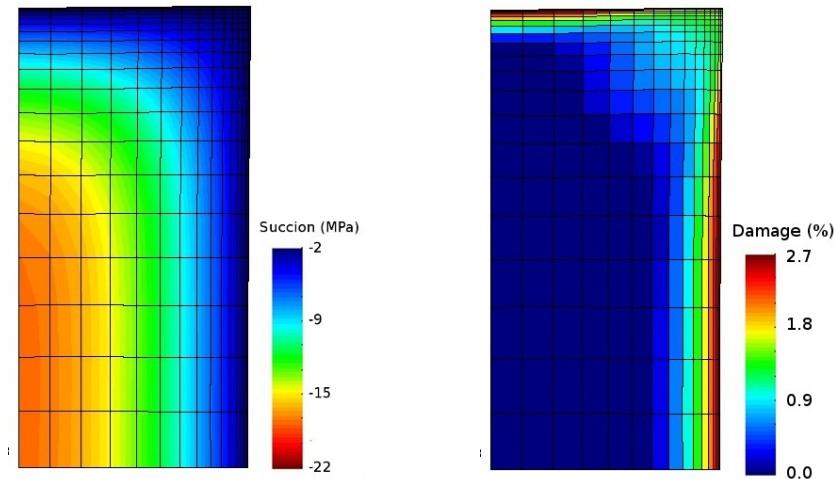


Humidification

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

Endommagement

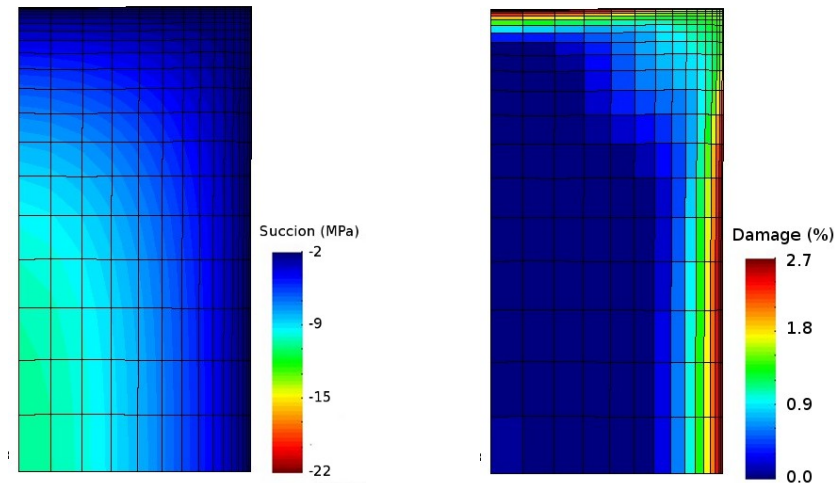


Humidification

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

Endommagement

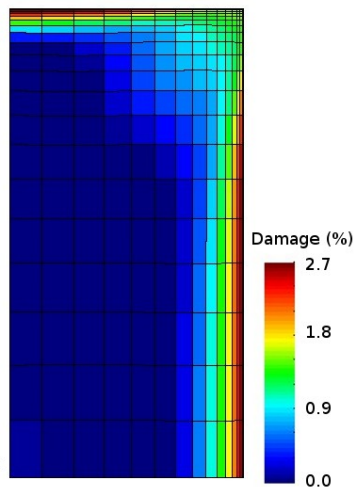
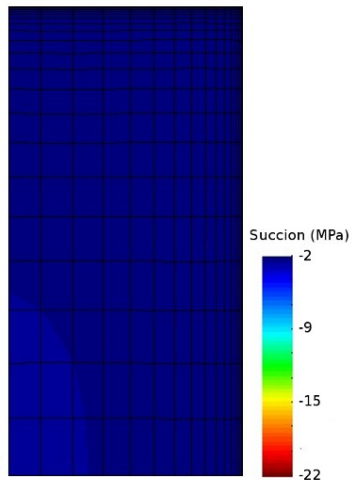


Humidification

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

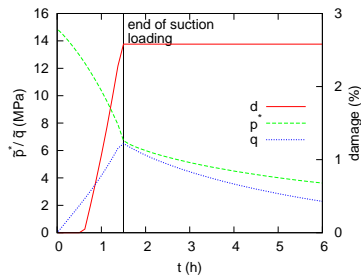
Pression d'eau

Endommagement

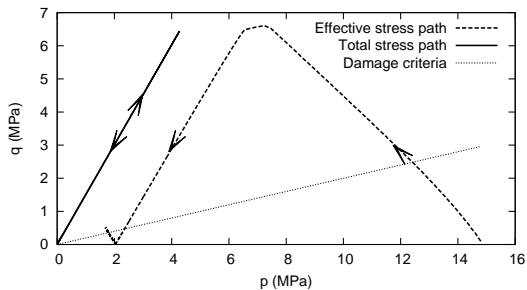


Humidification (Point B)

Évolution dans le temps

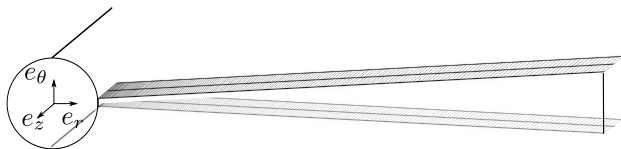


Chemin de chargement

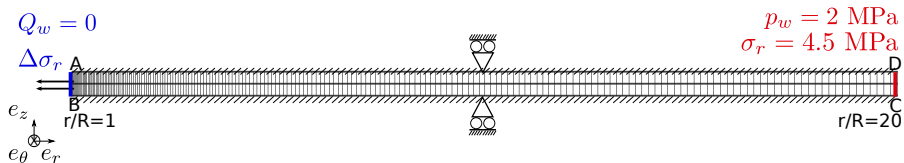


- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
 - Endommagement due à un chargement hydrique
 - Excavation non drainée
- 4 Conclusions

Excavation non drainée - argile de Boom

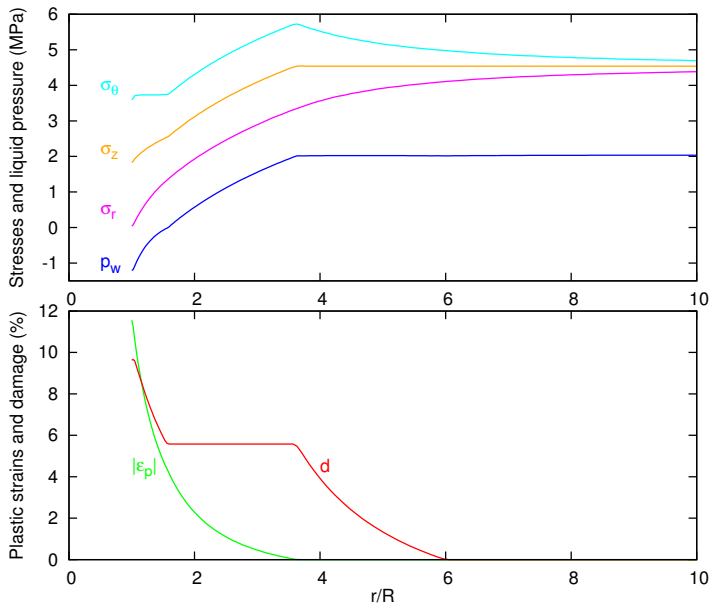


Problème axisymétrique



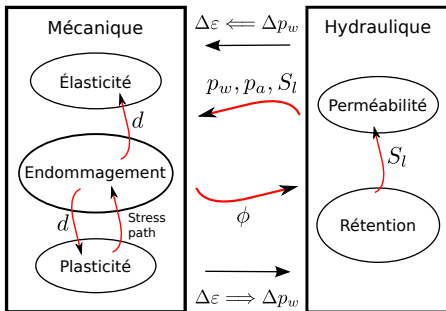
- **Conditions initiales** : $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = 4.5 \text{ MPa}$
- **Chargement** : AB : $\Delta\sigma_r = -4.5 \text{ MPa}$
- **Conductivité hydraulique** : $K_{w0} = 1.10^{-13} \text{ m.s}^{-1}$

Évolution spatiale



- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

Conclusions



- Développement d'un modèle constitutif couplant les phénomènes d'endommagement et de plasticité pour les géomatériaux non-saturés
- Cadre de modélisation adaptable à différents matériaux
- Implémentation dans un code Éléments finis pour simuler des problèmes hydromécaniques couplés
- Nombreuses applications en géomécanique

Merci pour votre attention